



# De la CAO aux calculs par éléments finis

Huimin Gassot

## ► To cite this version:

| Huimin Gassot. De la CAO aux calculs par éléments finis. 2005. in2p3-00023648

**HAL Id: in2p3-00023648**

**<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00023648>**

Preprint submitted on 9 Feb 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# DE LA CAO AUX CALCULS PAR ÉLÉMENTS FINIS

H. GASSOT

# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Nouvelle Interface CATIA et CAST3M</b>	<b>4</b>
2.1	Problématique . . . . .	4
2.2	Démarche et intérêt . . . . .	5
2.3	Programme d'interface . . . . .	6
2.3.1	Lecture d'un fichier CATIA . . . . .	6
2.3.2	Création d'un fichier CAST3M . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Applications au projet européen HIPPI</b>	<b>8</b>
3.1	Passage de la CAO au CAST3M pour les cavités TRIPLE SPOKE . . . . .	9
3.2	Chargements externes . . . . .	11
3.3	Conditions aux limites . . . . .	13
3.4	Simulations mécaniques des cavités HIPPI sous pression . . . . .	13
3.4.1	Fixation d'une extrémité du tube faisceau . . . . .	14
3.4.2	Cas où deux extrémités de faisceau sont fixées . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Annexes</b>	<b>24</b>

# Chapitre 1

## INTRODUCTION

Actuellement, l'IPN Orsay s'est beaucoup engagé dans des projets d'accélérateurs internationaux, notamment, des projets européens comme HIPPI (*High Intensity Pulsed Proton Injector*), EURISOL (*European ISOL Facility*), XADS (*eXperimental Accelerator Driven System*). Une partie importante des engagements de l'IPN Orsay concerne le développement et la mise en œuvre des structures accélératrices supraconductrices.

Autant des années d'expérience ont permis à l'IPN Orsay d'acquérir de nombreuses compétences sur la conception et la réalisation des cavités accélératrices supraconductrices elliptiques, pour la partie haute énergie (comprise entre 400 MeV à 1 GeV), autant de nouvelles aventures sont en perspective concernant la réalisation des cavités de type SPOKE. Ces dernières sont destinées à accélérer des protons de basse énergie (comprise entre 100 MeV et 400 MeV). Les formes géométriques des cavités de type SPOKE sont beaucoup plus compliquées que les cavités elliptiques : non seulement elles ne présentent aucune symétrie axiale, mais encore sont elles composées de pièces de forme très irrégulières. Par conséquent, la modélisation de ces cavités peut nécessiter un temps de travail important, voire générer des difficultés annexes, conduisant à un retard dans le respect du planning des projets. Les études de ces nouvelles cavités nécessitent donc des outils de calcul plus performants.

En matière de calculs 3D, un gain en délai assez significatif peut être réalisé si l'on arrive à associer correctement les outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et les outils de calculs. Le logiciel de dessin préconisé à l'IPN est CATIA, et l'un de code de calculs mécaniques utilisé depuis 1996 est Castem (Calcul et Analyse de Structure et Thermique par la méthode des Éléments Finis), un code de recherche conçu et développé par le Département de Mécanique et de Technologie du Commissariat français à l'Énergie Atomique. Ce code de haut niveau offre d'un éventail très large d'analyse dans le domaine de la mécanique et de la thermique, ses performances et son adaptabilité pour la conception des cavités supraconductrices ont été largement mises en lumière depuis de nombreuses années ([1], [2], [3]...). Cependant, à l'heure actuelle, il ne possède pas d'interface avec des outils de CAO, la réalisation des études en 3D se fait principalement «à la main», ce qui nécessite un temps assez important pour la partie modélisation ([4]).

L'objectif principal de ce rapport, est de présenter une nouvelle méthode de travail en 3D, qui consiste à créer une interface entre le logiciel de conception CATIA et le logiciel de calcul



CAST3M. Les apports de ce travail sont doubles : d'une part il permet de réduire considérablement le temps consacré à la modélisation en trois dimensions, de ce fait élargir la propre performance de CAST3M ; d'autre part il démontre concrètement une nouvelle possibilité d'associer la CAO aux codes de calcul.

En effet, jusqu'à présent, les interfaces développés dans les codes commerciaux permettent d'importer uniquement des dessins industriels, il faut ensuite vérifier et corriger de petites imperfections au niveau de l'interprétation, et mailler de nombreuses surfaces ; de la sorte, la réalisation d'un maillage massif en 3D représente encore une tâche très difficile. L'originalité du travail qui va être présenté dans ce rapport consiste à utiliser CATIA non seulement comme un outil de dessin, mais également comme un outil de maillage. Pour cela, un programme spécifique a été développé pour importer des maillages et non pas des dessins directement dans le code de calcul CAST3M.

# Chapitre 2

## Nouvelle Interface CATIA et CAST3M

### 2.1 Problématique

Le logiciel de calcul CAST3M ne dispose pas d'interface directe avec des logiciels de dessin, la philosophie de CAST3M est d'offrir un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul, mais également les fonctions de construction des modèles et les fonctions de post-traitement. Cependant, l'utilisation du modeleur de CAST3M nécessite une construction géométrique «à la main», lorsque les objets à construire ne sont pas de forme régulière comme cylindrique, sphérique etc, la construction en 3D peut devenir très vite un casse-tête. La philosophie de l'architecture de CAST3M s'explique lorsque l'on aborde des projets de recherche dont la durée d'élaboration est souvent assez longue et que plutôt que de modéliser toutes les pièces très compliquées, on réfléchit d'avantage à la simplification du modèle. De plus, elle date des années 80, où les logiciels de dessin n'avaient rien de comparable à ceux d'aujourd'hui. Mais à l'heure actuelle, se priver de l'assistance des outils de CAO comme CATIA peut être très dommage dans certains cas, car les récents progrès en informatique ont permis à ces logiciels d'augmenter considérablement leur performance.

En ce qui concerne le travail d'optimisation des cavités accélératrices supraconductrices, depuis 1996 jusqu'à présent, deux types de cavités ont fait principalement l'objet des études avec CAST3M : les cavités à électrons pour le futur collisionneur linéaire international TESLA (*Tera electron-volt Energy Superconducting Linear Accelerator*) et les cavités à protons pour un futur injecteur qui peut piloter un réacteur de spallation des neutrons. Dans les deux cas, les cavités ont toutes des formes axisymétriques. Lors des simulations, la plupart du temps les charges et les conditions aux limites ont eux aussi des distributions axisymétriques, ainsi le problème est simplifié en un problème 2D axisymétrique, la modélisation ne fait intervenir que deux paramètres géométriques : le rayon  $r$  et l'axe de faisceau  $z$ . Parfois, le chargement ne représente pas de symétrie, alors on est soit obligé de trouver des astuces et faire certaines hypothèses pour aboutir à un modèle 2D [5], ou alors de modéliser tout en 3D à la main [4], impliquant un temps de travail assez important. Le problème de modélisation en 3D est devenu assez préoccupant lorsque récemment un nouveau type de cavité supraconductrices SPOKE a fait l'objet d'études. Non seulement la géométrie de ce type de cavités ne possède pas de symétrie axiale, mais encore

sa forme géométrique présente un degré de complexité élevé (voir plus loin figure 3.1). Continuer à modéliser ce type de cavité à la main ou explorer un autre moyen de travail ? La première solution n'est pas impossible, mais seulement, à chaque fois qu'on est amené à modifier la configuration de la cavité, on est presque obligé de recommencer la lourde tâche de modélisation à la main de nouveau. A partir de là, la motivation d'élaborer un moyen supplémentaire est claire.

## 2.2 Démarche et intérêt

Pour établir un passage entre le logiciel de CAO CATIA et le logiciel de calculs CAST3M, le premier travail consistait à explorer les accès entrées ou sorties de ces deux logiciels. Côté CATIA, une utilisation avancée de ce logiciel consiste à utiliser un module d'analyse, qui permet non seulement de discrétiser l'objet dessiné en éléments finis, mais encore d'exporter les données et la connectivité des éléments sous forme de fichier ASCII. Côté CAST3M, le logiciel possède un format des fichiers de sauvegarde qui permet de décrire de façon lisible mais plus élaborée les maillages, c'est à dire les coordonnées des nœuds, les connectivités des maillages et des informations géométriques nécessaires au calcul comme le découpage des surfaces. A l'origine, ces maillages étaient réalisés par le modelleur de CAST3M, on pouvait alors stocker les maillages dans un fichier et les restaurer le cas échéant pour différents calculs.

L'idée de base a consisté à reconstituer un fichier de sauvegarde de CAST3M à partir d'un fichier de sortie CATIA ASCII. Ainsi, lorsque l'on effectue un calcul sur CAST3M, au lieu de restaurer un maillage réalisé par CAST3M, on peut aussi restaurer un maillage créé par CATIA.

L'intérêt de ce travail réside d'abord dans la connexion directe entre la CAO et les calculs. La plupart du temps, lorsqu'on élabore la conception d'un nouvel appareil, le travail de la CAO est indispensable, le dessin de la pièce sera de toute manière réalisé, et peut évoluer au cours du temps. La passerelle entre CATIA et CAST3M permet alors de transmettre directement les données de la CAO à l'entrée des calculs mécaniques ou autres, ainsi, la réactualisation de calculs en fonction de modification des paramètres de conception se fait nettement plus aisément.

En ce qui concerne la réalisation de cette passerelle CATIA-CAST3M, il suffit de pousser un peu plus l'utilisation CATIA en exploitant son module analyse pour créer des maillages à partir des données géométriques, puis créer un programme qui analyse les fichiers de maillages CATIA et reconstitue un fichier de maillage prêt pour le calcul CAST3M. On peut alors réaliser des calculs très performants lors de la conception d'appareils très complexes. En effet, malgré la bonne capacité de son modelleur, le logiciel CATIA ne permet d'effectuer que des calculs de structures en statique assez limités, à l'inverse, en dépit de son manque de convivialité en 3D, le logiciel CAST3M possède une très grande richesse dans de nombreux domaines de calculs. Ainsi, en combinant le code de calcul de haut niveau et le logiciel de dessin de haut de gamme, on obtient un outil plus performant pour la conception et les simulations.

## 2.3 Programme d'interface

Le programme d'interface entre CATIA et CAST3M, nommé désormais CAOàCAS, a été réalisé avec succès. Ce programme réalise simultanément deux tâches : la conversion des fichiers de type CAO à la norme du code CAST3M, en transformant les maillages et leurs connectivités d'un fichier CATIA à un fichier CAST3M; la reconnaissance à partir du maillage global massif de l'objet (créé par défaut par CATIA) d'un certain nombre de sous domaines cohérents selon les besoins de calculs. Par exemple, on a forcément besoin de récupérer les parties frontières du domaine où l'on fixe des conditions aux limites, également on a besoin d'imposer des chargements sur certaines parties. Le programme permet de trier ces parties. De plus le programme permet de réorienter correctement toutes les facettes, afin d'éviter toute discontinuité d'orientation des facettes adjacentes.

Le programme a été optimisé au niveau de la performance informatique, ainsi malgré ces lourdes tâches, par exemple, un maillage CATIA d'une cavité SPOKE triple gapes contient 20 000 nœuds, 58 000 éléments, le programme le reconnaît, trie les facettes, et convertit au format CAST3M en 18 secondes temps CPU, le tout est réalisé avec l'option double précision.

### 2.3.1 Lecture d'un fichier CATIA

Le fichier de description des maillages CATIA a pour titre «BULK DATA CARDS», il commence par «BEGIN BULK» et se termine par «ENDDATA». Un fichier contenant uniquement des maillages est composé de deux parties : en première partie, les coordonnées des nœuds précédés par un label «GRID»; en deuxième partie, les éléments finis caractérisés par un label spécifique, par exemple «CTETRA» désigne des éléments volumiques sous forme de tétraèdres.

A partir de la première partie du fichier de CATIA (avec label «GRID»), le programme CAOàCAS lit le numéro du nœud (champ 2), ses trois coordonnées (champs 3-5). A partir de la deuxième partie du fichier de CATIA (avec label «CTETRA»), le programme CAOàCAS lit le numéro des éléments (champ 2), la couleur des éléments (champ 3), et les quatre connectivités (champs 4-7). Pour l'instant, le programme se limite à lire uniquement des éléments tétraédriques linéaires.

### 2.3.2 Création d'un fichier CAST3M

La structure d'un fichier de CAST3M qui décrit des maillages est bien différente de celle d'un fichier CATIA, donc des remaniements des données sont effectués par le programme CAOàCAS.

L'architecture de CAST3M est basée sur le concept d'objets, le programme s'articule principalement autour de deux types d'éléments : d'abord les objets qui contiennent des informations permettant de les définir correctement ; puis des opérateurs qui exécutent un programme pré-enregistré, ce programme utilise des informations contenues dans les objets sources pour effectuer des calculs et/ou créer des objets résultats. En ce qui concerne les objets géométriques, CAST3M ne les reconnaît que par leur numéros sur leur piles respectives.

Dans un fichier CAST3M d'enregistrement des maillages, on trouve d'abord un paquet d'en-tête dont le nombre de lignes ne varie pas. Il contient un résumé des informations contenues

dans l'objet géométrique. On trouve ensuite un deuxième paquet qui définit toutes les piles, qui permettent de préciser successivement le type d'un élément, son nom, le nombre de sous parties, le nombre de nœuds par élément, le nombre d'élément, etc, et enfin les coordonnées de chaque nœud.

Le programme CAOàCAS élabore donc un fichier de sortie selon le format de CAST3M, ce fichier peut être lu directement par le code CAST3M lors de son lancement, on peut enchaîner par la suite différents types de calcul à partir du maillage récupéré.

## Chapitre 3

# Applications au projet européen HIPPI

Les premières utilisations du programme CAOàCAS ont été faites dans le cadre du projet européen HIPPI, sur la conception des cavités TRIPLE SPOKE [6].

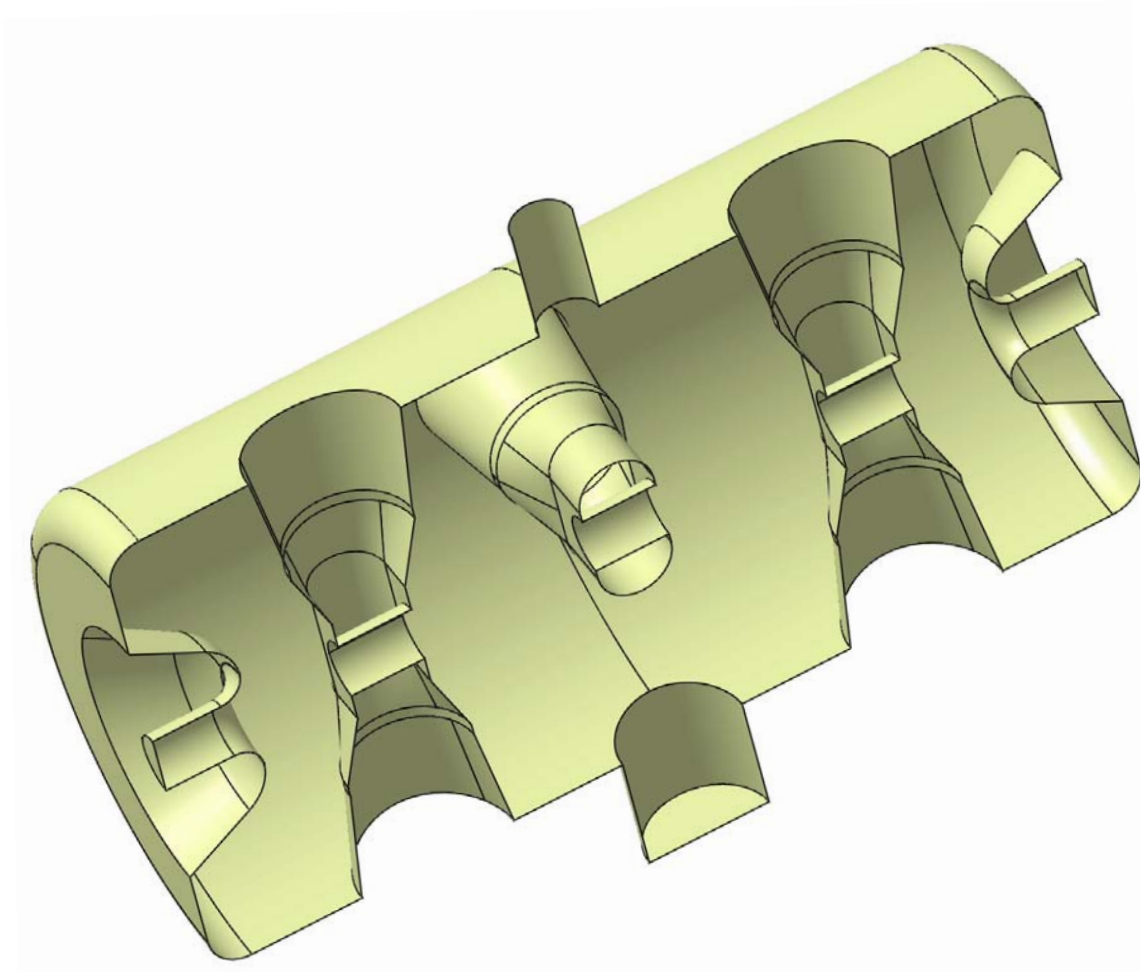


FIG. 3.1: Vue de la cavité TRIPLE SPOKE réalisée sous CATIA

Une vue en perspective d'une cavité HIPPI, réalisée sous CATIA est présentée en figure 3.1. C'est une cavité supraconductrice en niobium, elle est proposée comme structure accélératrice des accélérateurs à protons dans la partie base énergie, pour un  $\beta$  de 0,48. La fréquence de résonance de cette cavité est de 352 MHz. Le gradient accélérateur espéré de ces cavités est de 7 MV/m, avec un facteur de qualité supérieur à  $10^{10}$ .

Avant de réaliser le prototype, il est nécessaire de faire un certain nombre de simulations mécaniques, notamment la tenue de la paroi sous pression atmosphérique lorsque la cavité est sous vide. En effet, la fréquence de résonance d'une cavité supraconductrice est étroitement liée à sa géométrie. La parois de la cavité étant en niobium, ce matériau a une limite élastique relativement faible à la température ambiante (50 MPa). La plupart du temps, les cavités doivent être testées à chaud (température ambiante) avant d'être testées à froid (entre 1,5 K et 2 K). Lors des tests à chaud, si les contraintes dépassent la limite élastique, les déformations permanentes peuvent apparaître, changeant ainsi la forme de la cavité, et par conséquent sa fréquence de résonance. Dans la pratique, pour simuler les conditions de test, on applique une pression de  $10^5$  Pascal à la paroi extérieure de la cavité.

Pour réaliser un calcul par la méthode des éléments finis, la première étape consiste à modéliser géométriquement l'objet d'étude. L'utilisation du programme CAOàCAS a permis de faciliter considérablement cette tâche, dans le cas des cavités TRIPLE SPOKE présentées en figure 3.1.

### 3.1 Passage de la CAO au CAST3M pour les cavités TRIPLE SPOKE

Le dessin de la cavité TRIPLE SPOKE a été d'abord réalisé à l'aide de CATIA, ensuite le modeleur de CATIA a permis de créer des éléments finis en tétraèdre. Le maillage de la cavité est enregistré sur un fichier de données CATIA de type «BULK DATA» (annexe 1), mais on ne peut pas visionner directement ces maillages avec CATIA. Une visualisation du maillage, figure 3.2, a été rendue possible après exécution du programme CAOàCAS, et par l'intermédiaire d'un logiciel commercial d'imagerie Tecplot.

Par la suite, Les données du maillage ont été interprétées par le programme CAOàCAS sous format CAST3M dans un fichier `Cav3S.fic` (annexe 2). Le maillage global volumique 3D stocké dans le fichier `Cav3S.fic` est ensuite restauré lors de l'exécution de CAST3M, il devient alors un objet géométrique, qui peut être tracé par les dispositifs de visualisation de CAST3M, figure 3.3. Ce maillage comporte 39 923 nœuds, 119 861 éléments.

Avec CAST3M, on peut aussi bien faire un calcul directement sur des éléments volumiques 3D (des tétraèdres), qu'un calcul en coque mince sur des éléments coques 3D (des triangles). Dans les deux cas, il est nécessaire de diviser le maillage global (un seul ensemble) en plusieurs domaines. Dans le cas de calcul avec des éléments volumiques, on doit extraire des éléments surfaciques, modélisant la paroi extérieure de la cavité, et les surfaces sur lesquelles on attache la cavité. Dans le cas de calcul en coque mince, il faut également pouvoir récupérer soit la paroi intérieure, soit la paroi extérieure.



Longueur de la cavité : 780mm  
Diamètre extérieur : 424mm

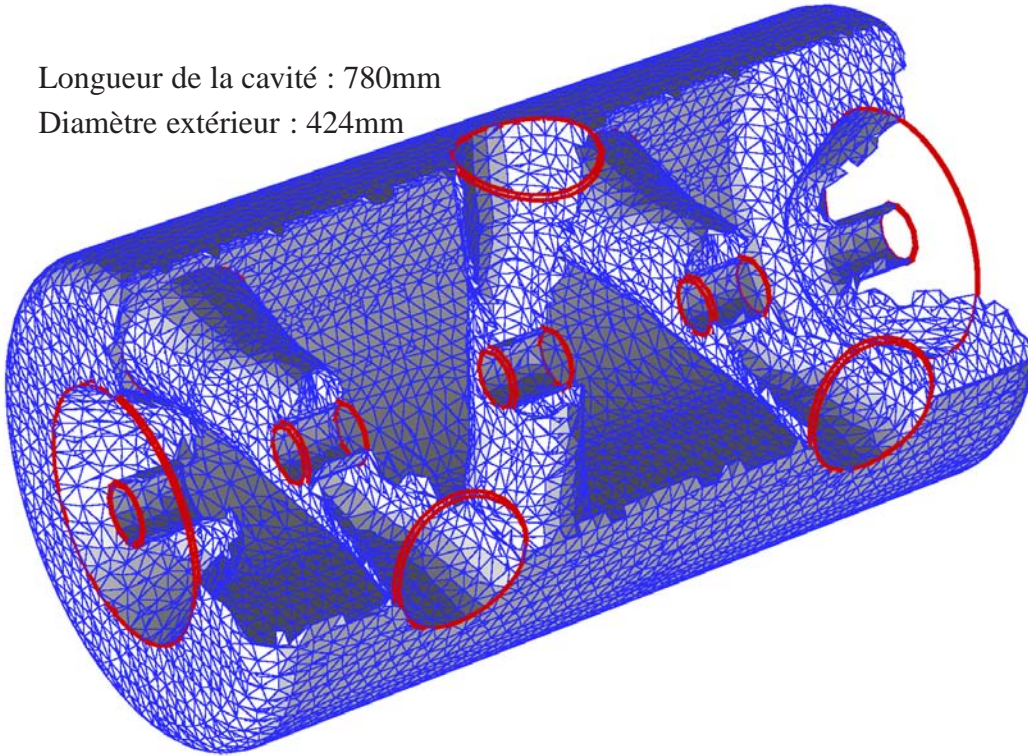


FIG. 3.2: Perspective de la cavité TRIPLE SPOKE discrétisé par des éléments tétraédriques

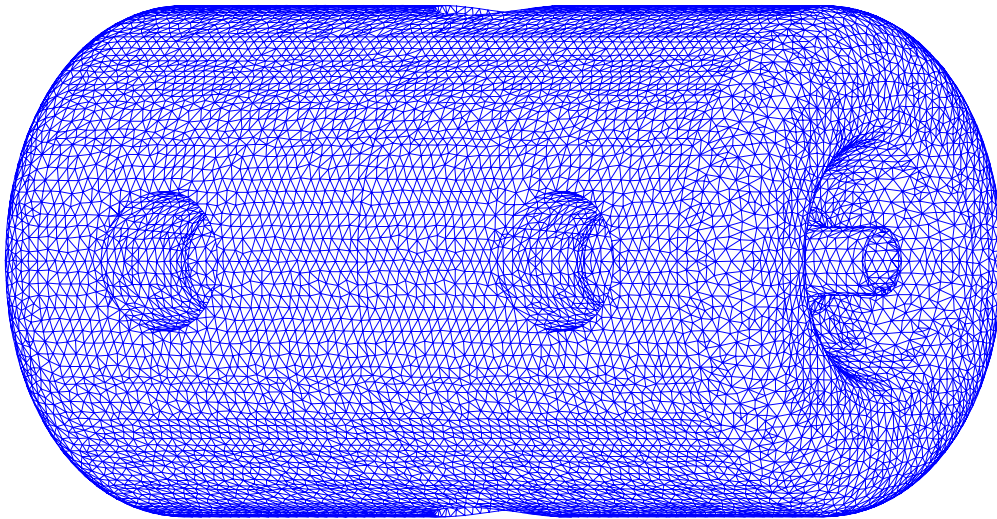


FIG. 3.3: Vu extérieure du maillage de la cavité TRIPLE SPOKE dans CAST3M



Dans le programme CAOàCAS, on examine d'abord les quatre facettes des tétraèdres et par élimination des facettes intérieures au volume, on isole l'enveloppe de l'objet. Selon un critère basé sur l'angle entre deux facettes voisines, on peut séparer les différentes faces de la surface. Ainsi, de fil en aiguille, on peut réunir toutes les facettes modélisant la paroi extérieure, puis celles de la paroi intérieure et également celles des extrémités de la cavité, le tout à partir des tétraèdres que constituent les éléments volumiques. Ainsi, il n'y a pas de création d'objets géométries supplémentaires pour les parois et les attaches aux extrémités, on a donc une gestion optimale des ressources informatiques. Pour l'illustration, sur la figure 3.4, les maillages (surficiels) de trois tubes SPOKE sont représentés, ils sont directement extraits du maillage volumique tétraédrique, figure 3.2.

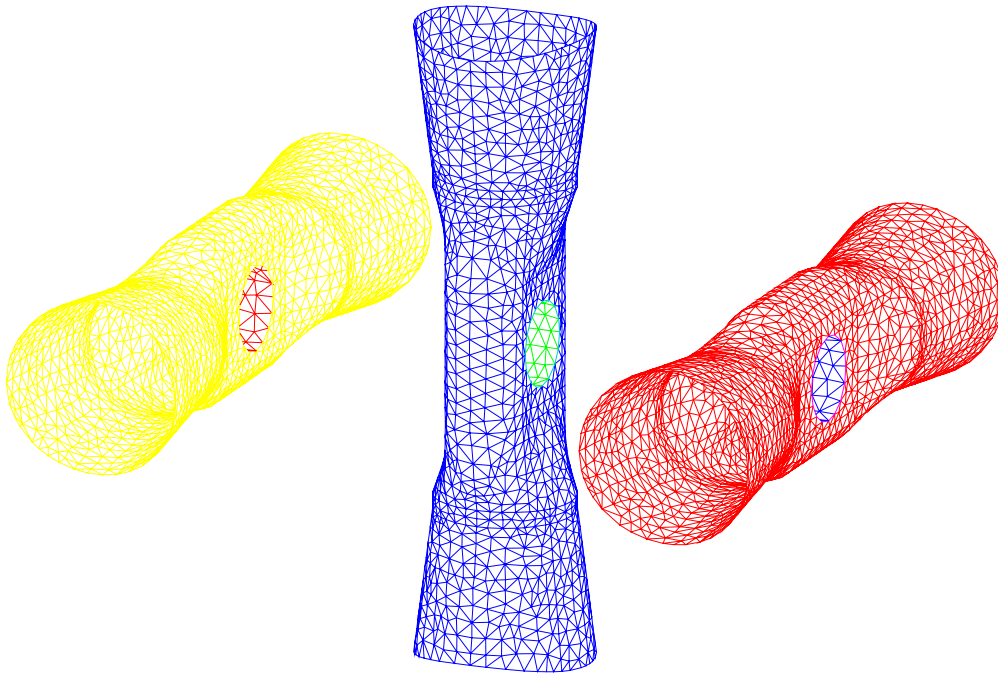


FIG. 3.4: Vue des pièces intérieures de la cavité TRIPLE SPOKE

## 3.2 Chargements externes

Après la discrétisation géométrique de la cavité, il faut prendre en considération des forces extérieures exercées sur la cavité. En ce qui concerne les tests des cavités à chaud, lors du fonctionnement, la cavité est sous vide à l'intérieur, sa paroi extérieure est soumise à la pression atmosphérique. Pour appliquer cette distribution de forces de pression dans le code de calcul CAST3M, il faut non seulement pouvoir identifier l'objet géométrique modélisant la paroi extérieure, mais encore que toutes les facettes sur lesquelles sont appliquées la pression soient orientées vers la même direction. Si CAST3M détecte deux facettes adjacentes d'orientations op-

posées, alors il est perdu. Pour cela, un travail préalable de réorientation automatique des facettes selon le théorème de d'Alembert a été effectué dans le programme CAOàCAS, ainsi, il inverse la normale d'un élément mal orienté. Par défaut, le programme CAOàCAS oriente la normale de la surface vers l'intérieur de la cavité.

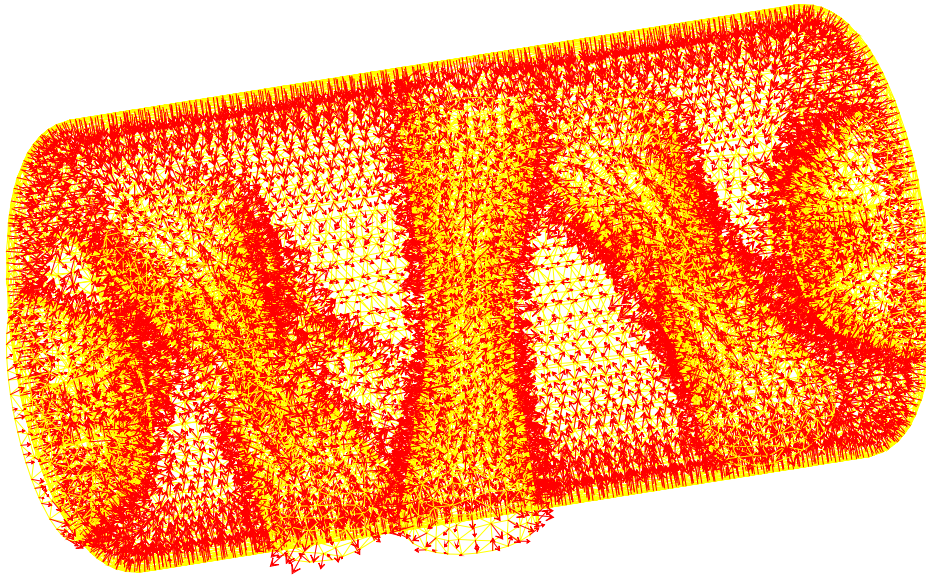


FIG. 3.5: Force de pression exercée sur la peau extérieure de la cavité

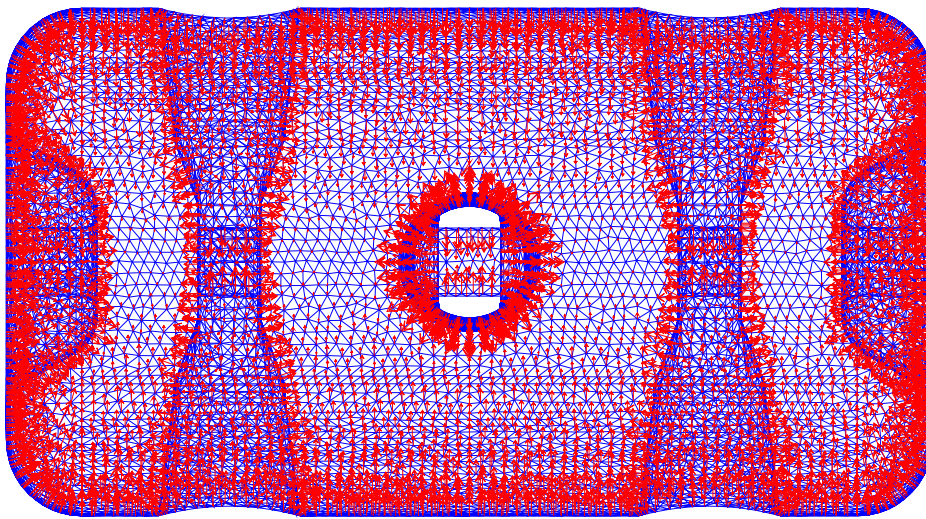


FIG. 3.6: Coupe de la représentation vectorielle de la pression extérieure sur la cavité

Une pression de  $10^5$  Pascal a été appliquée à la paroi extérieure de la cavité. Une présentation vectorielle de la répartition de pression globale est illustrée sur la figure 3.5, la figure Vect-P-coupe donne une vue coupe de figure 3.5.

### 3.3 Conditions aux limites

Pour des simulations concernant le fonctionnement des cavités supraconductrices, la définition des conditions aux limites a une grande importance sur les résultats obtenus. En pratique, ces conditions traduisent les conditions de fixation de la cavité. Ainsi, si l'on veut comparer ultérieurement les résultats de simulations aux résultats de mesure, la prévision de fixation de la cavité doit être la plus réaliste que possible. De l'autre côté, les simulations permettent de voir les possibilités de mieux répartir les contraintes, en modifiant les paramètres et les conditions aux limites pour que le choix du niveau de fixation soit le plus judicieux. Il convient par la suite, lors de la réalisation des expériences, de respecter le plus possible le cahier des charges optimisé par les calculs.

Dans ce document, deux possibilités de fixation de la cavité sont étudiées. Cela permet d'illustrer l'influence des conditions aux limites sur les résultats de calcul. Dans la phase d'étude, ces conditions aux limites ont de forte chance d'être modifiées au fur et à mesure que d'autres facteurs physiques seront introduits dans les considérations.

### 3.4 Simulations mécaniques des cavités HIPPI sous pression

L'ultime étape est évidemment la résolution du problème discrétisé. Cette étape comporte :

- Calcul des matrices de rigidité et de masse des éléments.
- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Résolution du système d'équation d'équilibre.

Les matrices de rigidité et de masse des éléments sont calculées à partir des propriétés des matériaux. On suppose d'abord que l'analyse du problème est linéaire, c'est à dire que les déformations de la paroi sont parfaitement élastiques. La paroi est en niobium, un matériau supraconducteur. Les propriétés élastiques du niobium utilisées dans les calculs sont :

- 107 GPa pour le module d'élasticité
- 0,3 pour le coefficient de Poisson
- 8 580 kg/m<sup>3</sup> pour la masse volumique

Pour un maillage comportant 39 923 nœuds et 119 861 éléments, le temps de résolution système est de 16 min CPU.

Les résultats des simulations sont présentés selon deux cas de fixation de la cavité, les simulations ont été réalisées en utilisant des éléments coques en 3D. Ces résultats comportent trois volets : les valeurs des déplacements, les formes des déformées et la distribution des contraintes de Von Mises.



### 3.4.1 Fixation d'une extrémité du tube faisceau

On considère d'abord la configuration avec le minimum de fixation : la cavité est fixé uniquement sur une extrémité du tube faisceau.

1. Les iso-valeurs des déplacements de la cavité dans les trois directions sont présentées dans les figures 3.7-3.9.

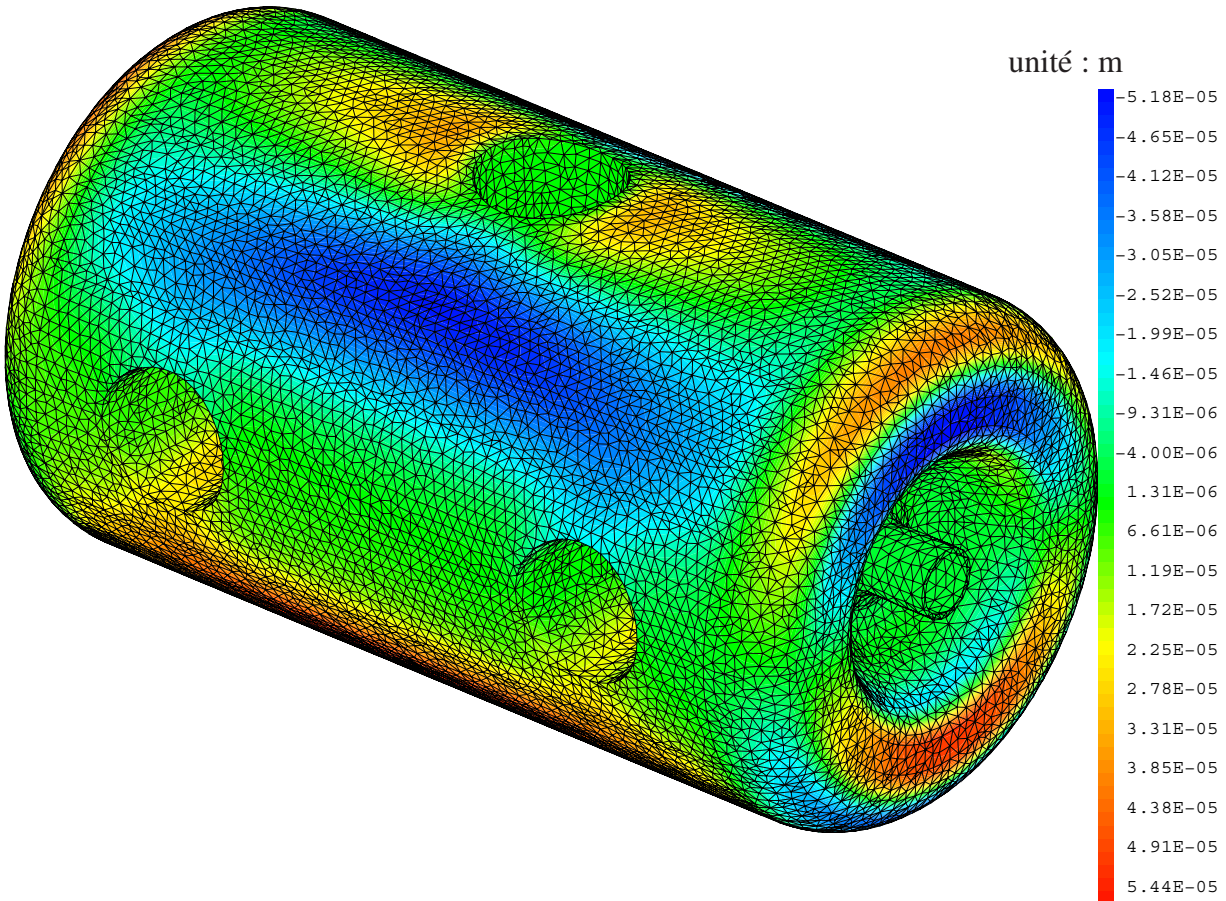


FIG. 3.7: Déplacements verticaux de la cavité

La cavité présente deux plans de symétrie géométrique : le plan horizontal passant par l'axe du faisceau, et le plan vertical passant par le milieu de l'axe du faisceau. Comme la répartition de pression respecte aussi ces symétries, les déplacements doivent les respecter également. Dans les deux premières figures 3.7-3.8, on voit clairement que pour deux points situés l'un à l'opposé d'un plan de symétrie, les valeurs de déplacements sont de valeurs égales mais de signes opposés. Par contre, cette symétrie n'apparaît pas sur la figure 3.9 : une extrémité du tube faisceau étant supposée fixe. Si l'on avait fixé les déplacements axiaux du plan vertical au milieu de la cavité, alors la symétrie aurait été visible. Mais dans les deux cas, les valeurs des déformations sont identiques.

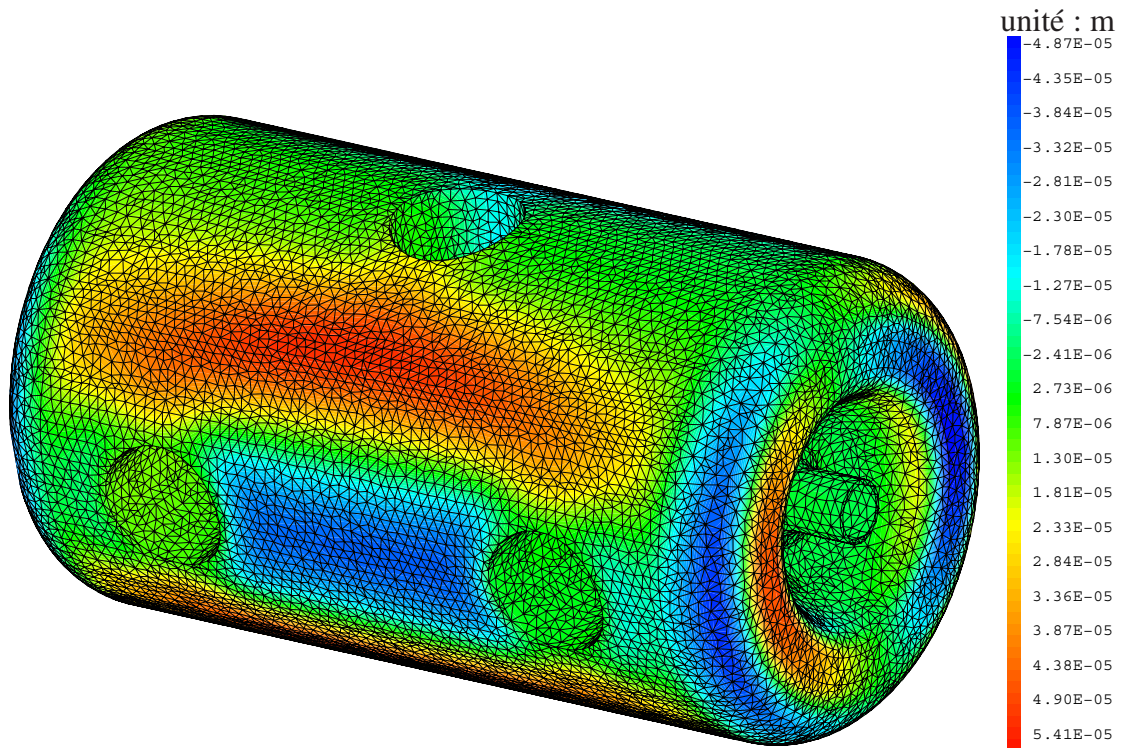


FIG. 3.8: Déplacements horizontaux perpendiculaires à l'axe

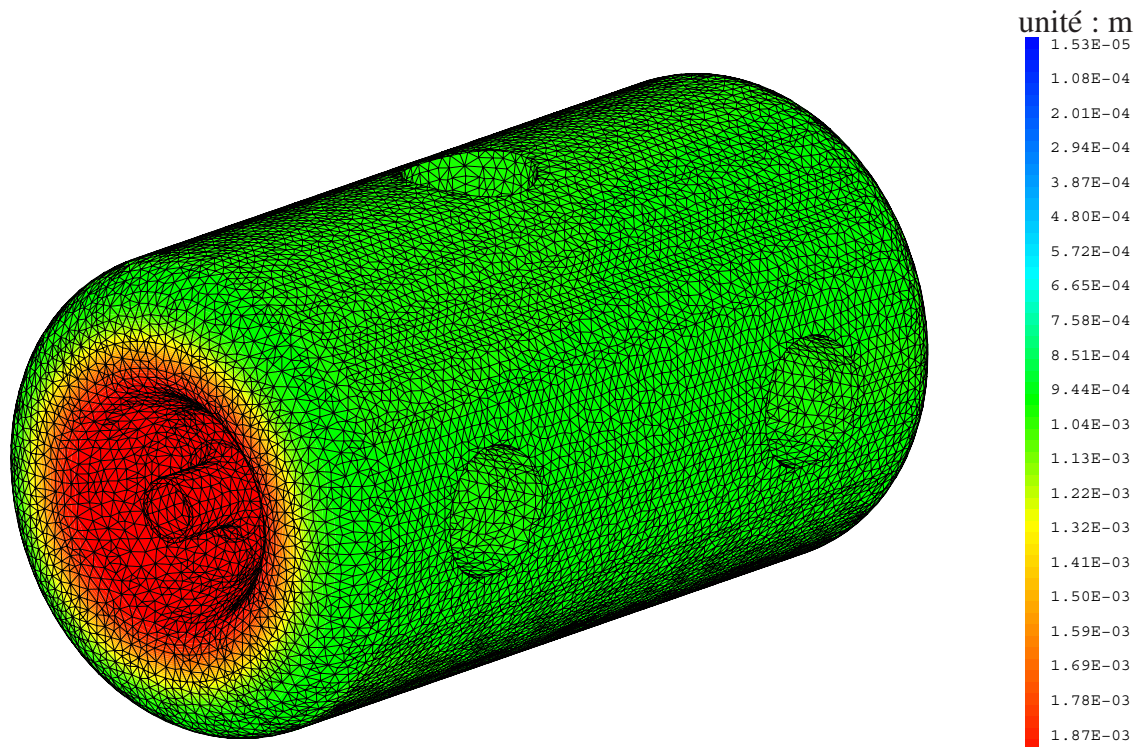


FIG. 3.9: Déplacements axiaux de la cavité



Les calculs montrent que les déformations dans la direction axiale sont d'un ordre de grandeur supérieur aux déformations dans les deux directions transversales. La valeur maximale des déplacements présentés en figure 3.9 est de 1,87 mm. On remarque que, dans les simulations, si c'étaient les déplacements du plan de symétrie vertical situé au milieu de l'axe qui étaient supposés nuls, les deux extrémités de la cavité se seraient déplacées exactement de la même valeur par rapport au plan, mais dans des sens opposés. Cette valeur serait la moitié de la valeur du déplacement d'une extrémité libre lorsque l'autre extrémité est fixe, c'est à dire 0,935 mm.

2. La forme de la déformée est présentée en figure 3.10

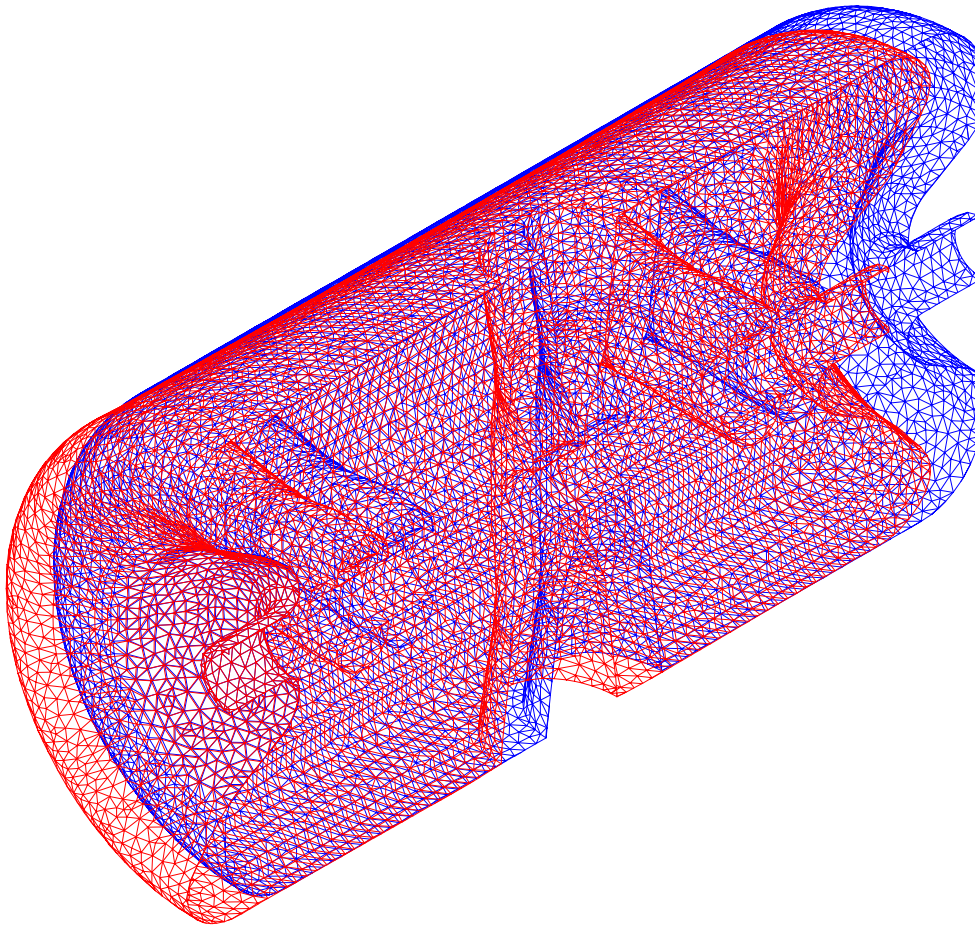


FIG. 3.10: Déformation de la cavité, amplification :47

Cette représentation de la déformée montre principalement un déplacement prépondérant dans la direction axiale vers l'extrémité fixe. Les déplacements dans les autres directions étant d'un ordre de grandeur inférieur.

3. La distribution des contraintes de Von Mises

Dans les calculs par éléments finis, à partir des déplacements aux nœuds on remonte aux déplacements dans les éléments puis aux contraintes. Pour situer les états de contraintes dans les matériaux par rapport à la limite élastique, on utilise souvent les contraintes de Von Mises. Elles sont calculées à partir des efforts membranaires et de flexion, ainsi que des caractéristiques des matériaux. C'est une sorte de contrainte moyenne que l'on utilise souvent pour comparer aux limites élastiques des matériaux. Dans le cas de cette application, les déformations sous pression doivent rester dans le domaine élastique pour éviter des déformations plastiques, car la fréquence de résonance d'une cavité est étroitement liée à sa forme.

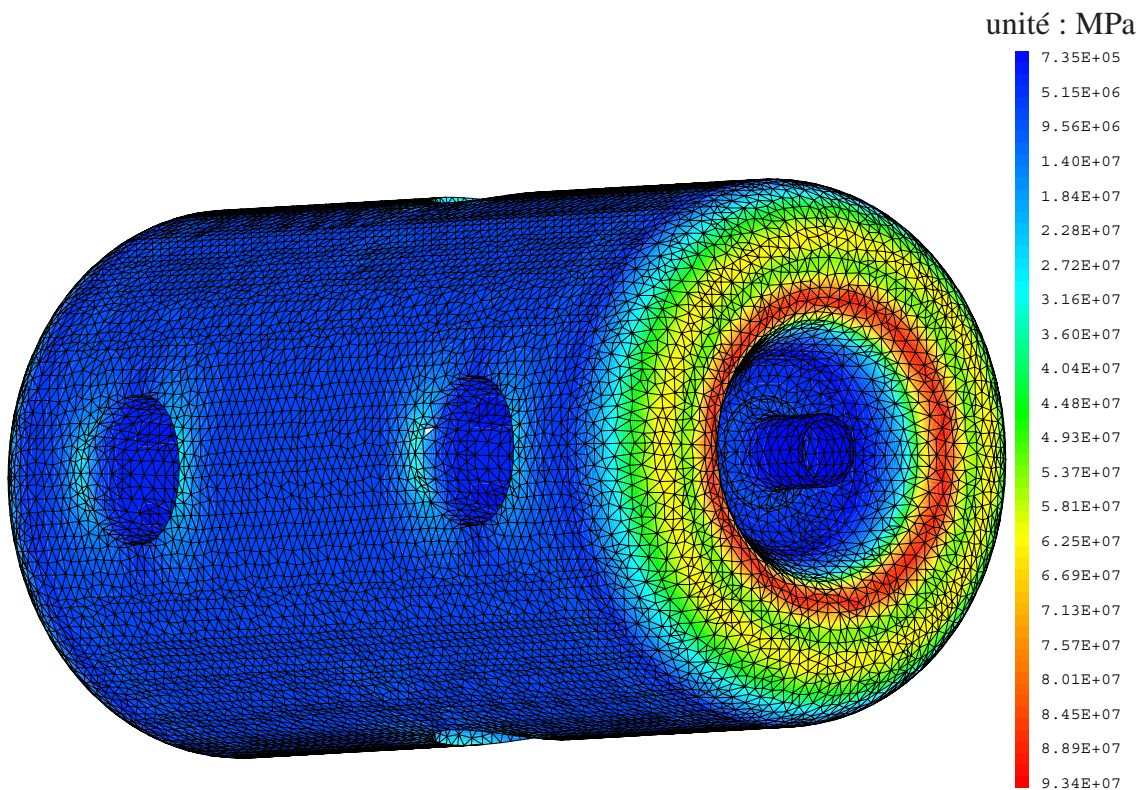


FIG. 3.11: Contraintes de Von Mises

Les premiers calculs montrent donc un niveau de contrainte très élevé, la valeur maximale de contrainte de Von Mises dépasse largement la limite d'élasticité du niobium à la température ambiante, à savoir 50 MPa. Il faudra donc soit modifier les paramètres géométriques de la cavité, soit ajouter des renforts supplémentaires.

### 3.4.2 Cas où deux extrémités de faisceau sont fixées

Au niveau de fixation, on peut aussi théoriquement bloquer complètement les deux extrémités de tube faisceau.

1. Les isovaleurs des déplacements de la cavité dans les trois directions sont présentées dans les figures 3.12-3.14.

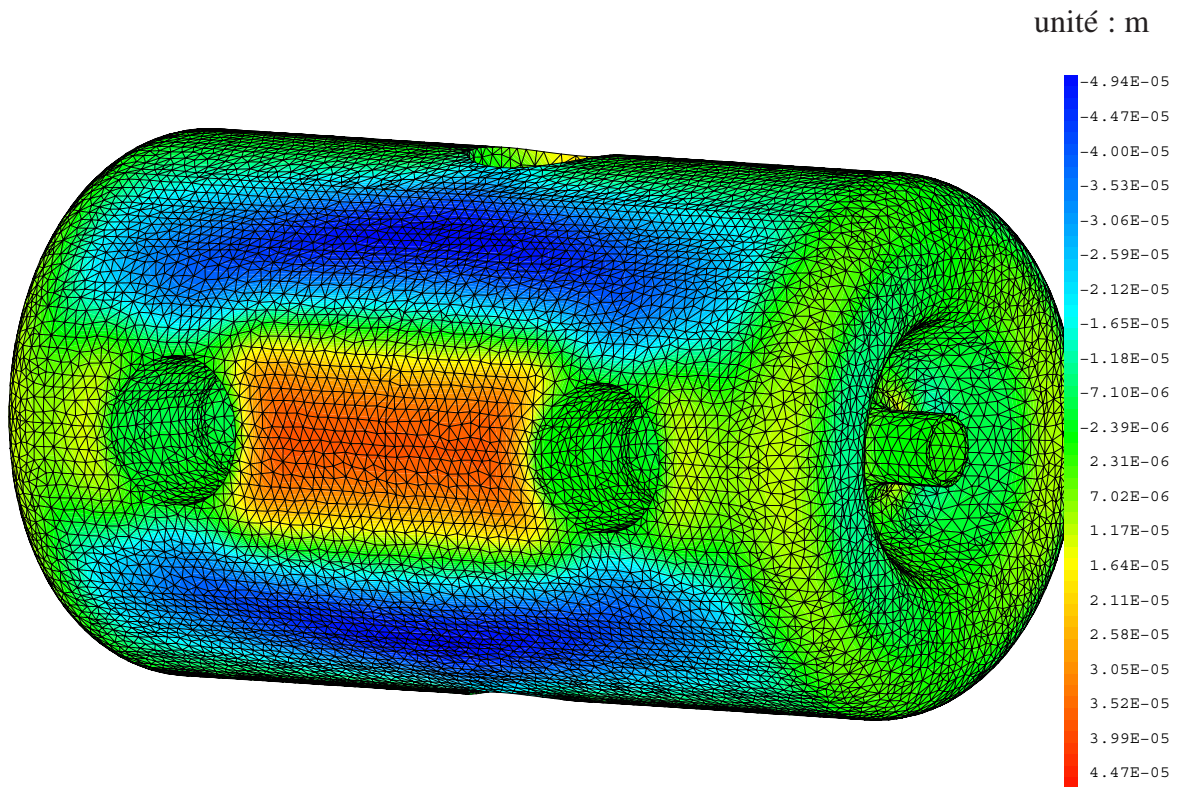


FIG. 3.12: Déplacements verticaux de la cavité

Les déplacements dans tous les plans perpendiculaire à l'axe du faisceau représentent des symétries par rapport au plan horizontal et par rapport au plan vertical au milieu dans le sens axial. Le déplacement maximal est de  $4.45 \times 10^{-5}$ .



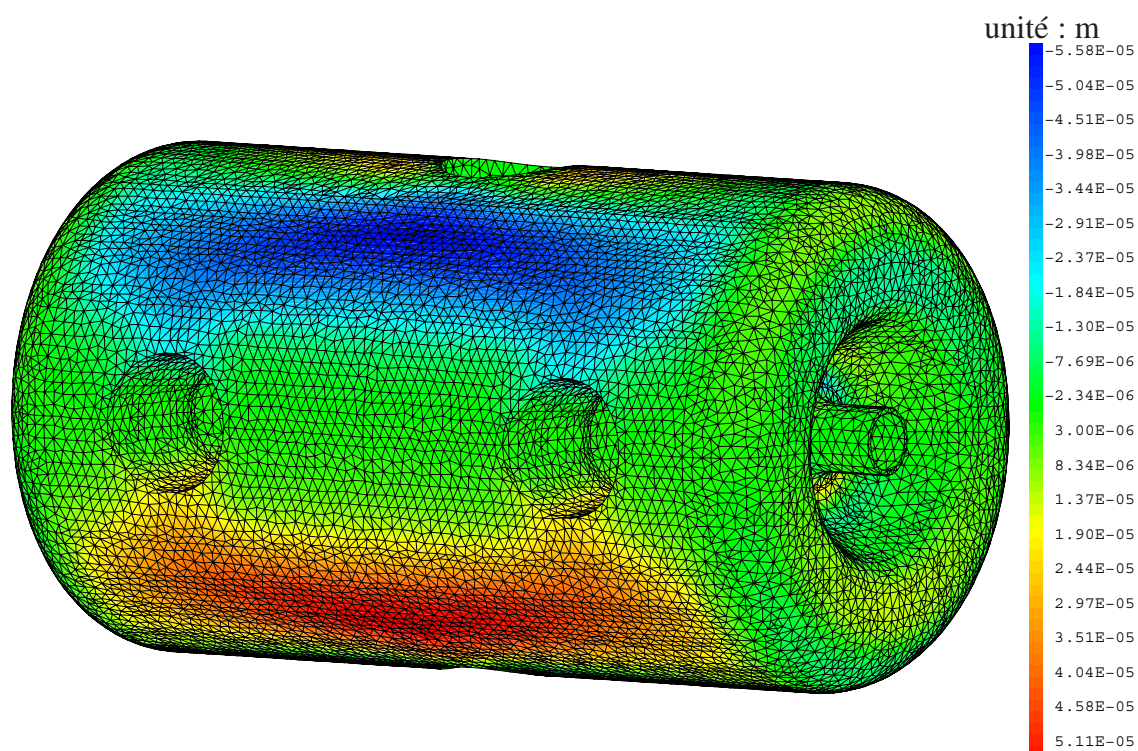


FIG. 3.13: Déplacements horizontaux perpendiculaires à l'axe

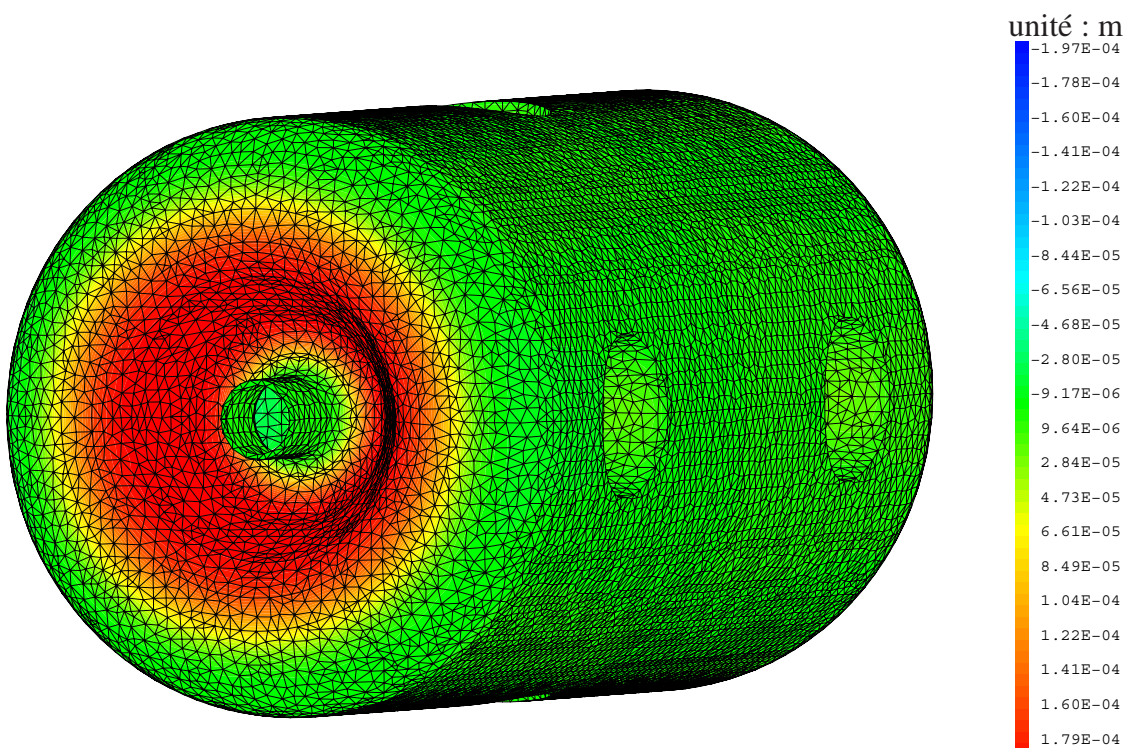


FIG. 3.14: Déplacements axiaux de la cavité

Contrairement au cas précédent, les deux extrémités du tube faisceau étant fixes, les déplacements axiaux, représentés en figure 3.14, sont symétriques par rapport au plan médian axial.

En revanche, comme le cas précédent, les déplacements axiaux sont toujours d'un ordre de grandeur supérieurs aux déplacements dans les directions transversales.

2. La forme de la déformée est présentée en figure 3.15

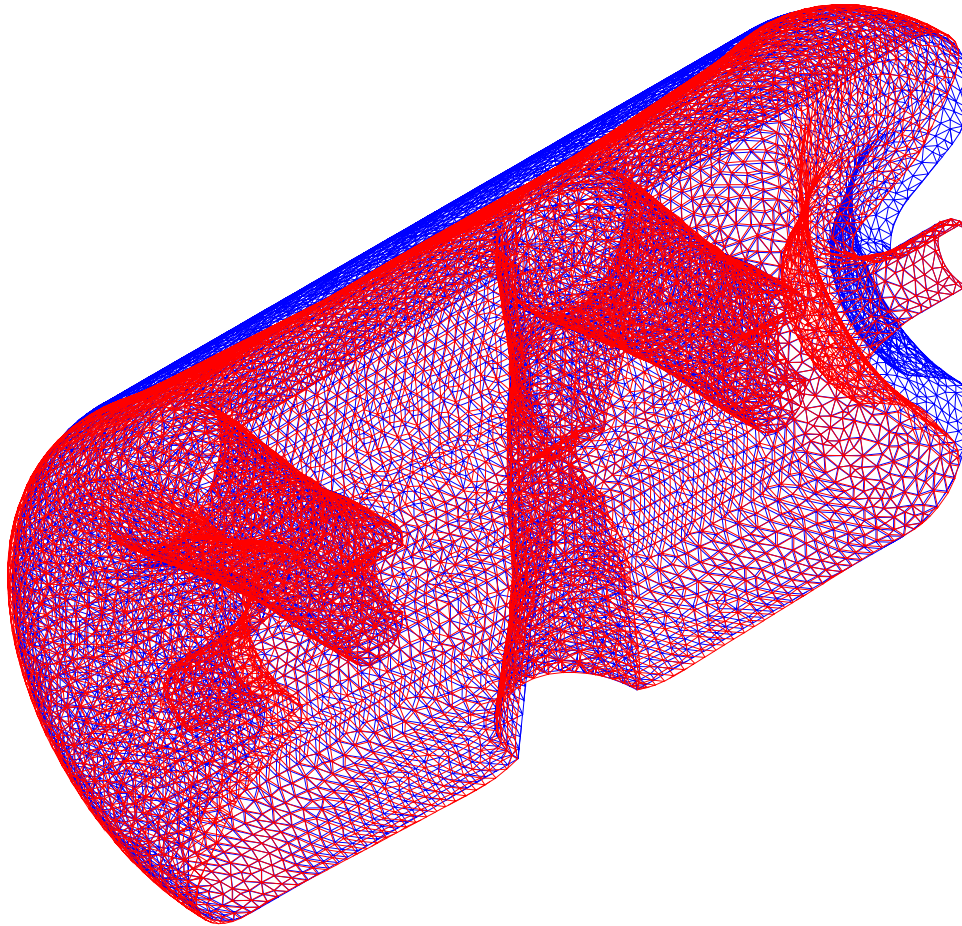


FIG. 3.15: Déformation de la cavité, amplification :47

Par rapport aux déformations présentées en figure 3.10, on observe davantage les déformations des flancs frontaux et du tube cylindrique extérieur, conformément aux valeurs maximales affichées sur les figures 3.12, 3.13 et 3.14.

3. La distribution des contraintes de Von Mises



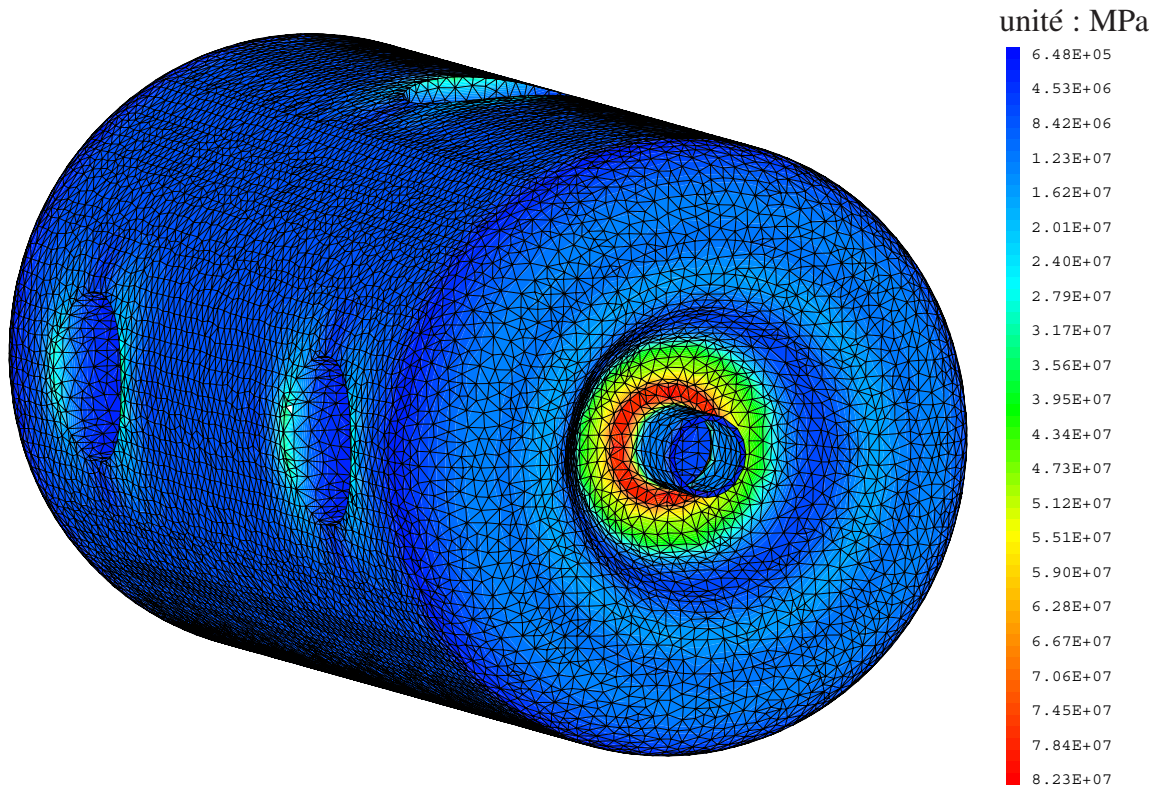


FIG. 3.16: Contraintes de Von Mises, tubes faisceaux fixes

Si l'on compare les résultats présentés en figure 3.16 aux résultats présentés en figure 3.11, on voit que la localisation de la zone à contraintes maximales n'est plus la même. C'est la partie conique de la cavité, à proximité du tube faisceau qui subit la plus forte contrainte. Le niveau maximal des contraintes est moins élevé par rapport aux contraintes présentées en figure 3.11, mais dépasse toute même la limite élastique (50 MPa).

En réalité, la cavité doit être baignée dans un bain d'hélium, on peut difficilement fixer complètement les deux extrémités du tube faisceau. En tout cas, les renforts supplémentaires sont à prévoir pour réduire le niveau de contrainte.

La figure 3.17 montre la distribution de contrainte sur les parties cachées, à savoir les trois tubes SPOKE.

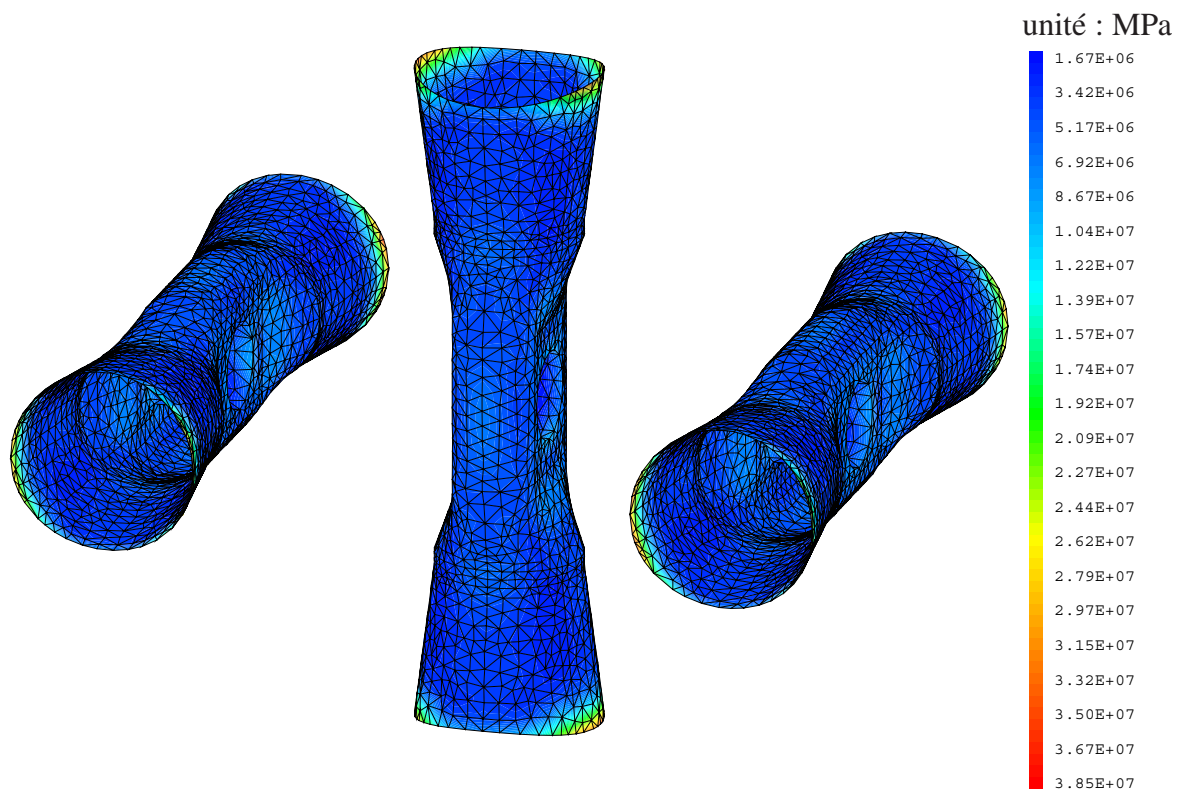


FIG. 3.17: Contraintes de Von Mises, tubes faisceaux fixes

## Chapitre 4

# Conclusions et Perspectives

Dans ce rapport, un travail original a été présenté, il permet de relier directement l'outil de CAO CATIA au code de calculs mécaniques CAST3M. Ce travail permet désormais de simplifier considérablement la tâche de modélisation dans les calculs, l'outil d'interface CAOàCAS augmente considérablement les performances de calculs 3D avec CAST3M. Ainsi, toutes modifications de configuration ou de paramètre, aussi bien au niveau de conception ou dans la phase de fabrication peuvent être prises en compte très rapidement dans les calculs.

Cet outil d'interface a été créé sous l'impulsion du projet européen HIPPI, son utilisation dans le cadre de ce projet a apporté les premiers fruits. La transcription d'un maillage comportant 120 000 éléments tétraédriques de la cavité TRIPLE SPOKE, grâce à CAOàCAS, n'a nécessité que 18 secondes du temps CPU, alors que l'on peut estimer le temps nécessaire pour mailler cette cavité «à la main» sous CAST3M de l'ordre du mois. Cette grande performance a été obtenue après un travail d'optimisation informatique de l'outil CAOàCAS. Cet outil de travail peut trouver très rapidement un vaste champ d'utilisation, d'autres utilisateurs de CAST3M ainsi que le développeur du CAST3M sont déjà intéressés par ce programme.

En ce qui concerne les études des cavités TRIPLE SPOKE, les premiers calculs montrent l'apparition de forte contrainte lorsqu'elle est sous vide, il faut donc élaborer des systèmes de renfort, facilement réalisables et compatibles avec d'autres exigences, notamment en tenant en compte de l'intégration de la cavité dans le tank d'hélium. Les autres études sont à poursuivre.

# Chapitre 5

## Annexes

### 1. Annexe 1 : BULK DATA CARDS

BEGIN BULK

---

.. NODES

---

GRID\* 1 30,650000000 33,000000000 -48,300000000  
GRID\* 2 30,650000000 33,000000000 48,300000000  
GRID\* 3 -30,650000000 33,000000000 -48,300000000  
GRID\* 4 -30,650000000 33,000000000 48,300000000  
GRID\* 5 30,650000000 -33,000000000 -48,300000000  
GRID\* 6 30,650000000 -33,000000000 48,300000000

...

---

.. ELEMENTS

---

MESH PART : MSHPartOctree3D.1  
CTETRA 1 1 3014 3013 3010 3282  
CTETRA 2 1 3012 3011 3013 3277  
CTETRA 3 1 3282 3010 3011 3013  
CTETRA 4 1 3278 3013 3282 3277  
CTETRA 5 1 4335 1419 4303 212  
CTETRA 6 1 3277 3011 3013 3282  
CTETRA 7 1 571 335 3283 570  
CTETRA 8 1 3372 2974 571 335

...

ENDDATA

## 2. Annexe 2 : fichier sour format Cast3m

```
ENREGISTREMENT DE TYPE 4
NIVEAU 12 NIVEAU ERREUR 0 DIMENSION 3
DENSITE 0.00000E+00
ENREGISTREMENT DE TYPE 7
NOMBRE INFO CASTEM2000 8
IFOUR 2 NIFOUR 0 IFOMOD 2 IECHO 1 IIMPI 0 IOSPI 0 ISOTYP 1 NSDPGE 0
ENREGISTREMENT DE TYPE 2
PILE NUMERO 1NBRE OBJETS NOMMES 5NBRE OBJETS 5
TOUT000 PART001 PART002 PART003 PART004
1 2 3 4 5
23 0 0 4 33273
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

...
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
3010 3013 3014 3282 3011 3012 3013 3277 3010 3011
3013 3282 3013 3277 3278 3282 212 1419 4303 4335
3011 3013 3277 3282 335 570 571 3283 335 571
2974 3372 46 547 2925 3351 335 3011 3282 3283

...
11071 11072 11073 11074 11075 11076 11077 11078 11079 11080
11081 11082 11083 11084 11085 11086 11087 11088 11089 11090
11091 11092 11093 11094 11095 11096 11097 11098 11099 ENREGISTREMENT DE
TYPE 2
PILE NUMERO 33NBRE OBJETS NOMMES 0NBRE OBJETS 1
44396
3.000000000000000E-08 6.50000000330000E+01 -4.800000000000000E-08
0.000000000000000E+00 3.000000000000000E-08 6.50000000330000E+01
4.800000000000000E-08 0.000000000000000E+00 -3.000000000000000E-08
6.50000000330000E+01 -4.800000000000000E-08 0.000000000000000E+00
...
6.64698283400000E+00 -5.26877970110000E+01 7.75561081470000E+01
0.000000000000000E+00 3.87166166111000E+02 -4.67196226360000E+01
1.06804543859000E+02 0.000000000000000E+00
ENREGISTREMENT DE TYPE 5
LABEL AUTOMATIQUE : 1
```

# Bibliographie

- [1] H. GASSOT, T. JUNQUERA, *Effets de pression de radiation et méthodes de rigidification des cavités TESLA* IPNO 98-06, IPN Orsay France, Juin 1998
- [2] H. GASSOT, H. SAUGNAC, T. JUNQUERA, J.L. BIARROTTE *Effets des forces de Lorentz et système d'accord en fréquence pour des cavités à protons* rapport IPN, IPNO 01-10, Mai, 2001
- [3] H. GASSOT *Mechanical stability of the radiofrequency superconducting cavities* proceedings of the 8th European Particle Accelerator Conference, 3-7 juin 2002, Paris
- [4] H. GASSOT *Analyse de structure du cryostat LHC* rapport IPNO, n° 98-09, mai 1997
- [5] H. GASSOT *Analyse des effets thermiques dans les cavités supraconductrices* rapport du DEA Grands Instruments, Université Paris VI, juin 1996
- [6] E. ZAPALTINE ET AL *Triple-spoke Cavities in FZJ EPAC04*, Luzern, SUISSE, Juillet 2004



## **RÉSUMÉ**

L'objectif principal de ce travail était de créer une interface entre l'outil de CAO CATIA et le code de calcul par éléments finis CAST3M. Ce travail a été motivé lors de l'élaboration du nouveau type de cavités supraconductrices « triple Spoke ». La conception de ce type de cavité nécessite des calculs 3D multidisciplinaires en électromagnétique et en mécanique. Un des outils les plus adaptés pour ce genre de calcul est CAST3M. Mais ce dernier manquait de convivialité dans sa partie concernant le maillage en 3D. Pour travailler plus efficacement sur des objets comme les cavités triple Spoke, un autre modelleur plus performant devait épauler CAST3M. Une démarche originale, qui consiste à utiliser le modelleur de CATIA comme pré-processeur de CAST3M a été entreprise. Le travail consiste à élaborer un programme CAOàCAS qui permet non seulement de transcrire un maillage de CATIA dans le format préconisé par CAST3M, mais encore une analyse du maillage de façon à optimiser son utilisation pour les calculs. Cet outil a été utilisé avec succès dans le cadre du projet HIPPI, certains résultats de calculs ont été présentés dans ce rapport.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work was to create an interface between the CAD design tool CATIA and a finite-elements (FEM) computation code : CAST3M. This work is motivated by the conception of a new type of superconducting cavities : the “triple Spoke” cavity. This cavity is aimed to accelerate the protons beam, in the low beta section, as part of the European project HIPPI. Some multi-physical problems should be studied for the design of this cavities, which involve 3D simulations. One of the useful FEM numerical codes is CAST3M, but its 3D modeling still needs time-consuming manual operations. The essential work presented in this report is to establish a program CAOàCAS, which allows the use of the FEM-mesh made by CATIA in CAST3M calculations. The concept of this interface is original, since usual interfaces are only at the level of drawing between CATIA and a commercial mechanical code. The first advantage of this work is the time saving at the stage of modeling. More, the developed program CAOàCAS performs a mesh analysis and a reorganization of the elements to make the calculations easier. This developed interface CAOàCAS is applied successfully to the concept of the triple spoke cavities for HIPPI project, some results are shown in this report.